

## ESTIMACIJA RADIO KANALA NA OSNOVU PILOTSKIH SEKVENCI PILOT SEQUENCES ASSISTED RADIO CHANNEL ESTIMATION

Aleksandar Birmančević, *Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIČKO I RAČUNARSKO INŽENJERSTVO**

**Kratak sadržaj** – *Estimacija radio kanala u ovom radu vezana je za postupak procene sistemske funkcije korisničkih kanala. Procene su potpomognute Zadoff-Ču pilotskim sekvencama koje se dodeljuju pojedinim korisnicima. Linearni Bajesov estimator procenjuje trenutno stanje kanala minimizovanjem svog rizika, gde je funkcija cene - srednja kvadratna greška. Estimator unosi grešku procene koja, kada je minimizovan Bajesov rizik, dostiže svoju minimalnu vrednost među svim linearnim/afinim estimatorima. Kvalitet procene kanala opisan je normalizovanim srednjim kvadratnim greškama.*

**Ključne reči:** *Bajesov estimator, radio kanal, antensko polje, pilotska sekvenca, pilotska kontaminacija*

**Abstract** - *The Radio Channel Estimation in this paper is related to the procedure of evaluating the system function of the user channels. These evaluations are assisted by the Zadoff-Chu pilot sequences that are assigned to users. A linear Bayes estimator estimates the instantaneous channel state by minimizing its risk, where the cost function is the Mean-Squared Error (MSE). The estimator induces an estimation error that reaches its minimum value among all linear/affine estimators once the Bayes risk is minimized. The quality of channel estimation is described by the Normalized Minimum Mean-Squared Errors (NMSEs).*

**Keywords:** *Bayes estimator, radio channel, antenna array, pilot sequence, pilot contamination*

### 1. UVOD

Povećanje broja korisničkih terminala, ali i minimalnih zahteva za nesmetan rad servisa koji se pokreću na ovim terminalima, zahtevaju ulaganja u dalji razvoj mrežne infrastrukture i tehnika prenosa informacija. Kada bazna stanica razlikuje dolazne uglove talasa na svom antenskom polju pod kojim ih korisnički terminali emituju, umetnuti signali u ovim talasima mogu da se ponavljaju u istim vremenskim trenucima, da zauzimaju identičan frekventni opseg, pa čak i da prenose istu informaciju. Bazna stanica će uspešno izdvojiti korisničke informacije i pridružiti ih svakom korisniku

koji ih je poslao. Na ovaj način, u uzlaznom smeru prenosa se štete vremensko-frekvencijski resursi u okviru ćelije koju opslužuje pomenuta bazna stanica. Uspešno izdvajanje korisničkog signala zavisi od ključnog faktora - kvaliteta procene njegovog kanalnog odziva, naročito u otežanim okolnostima kada su prostorni uglovi dolaznih talasa više korisnika vrlo bliski, na šta se ovaj rad orijentiše.

### 2. MOBILNI RADIO KANAL

Mobilni radio kanal predstavlja linearan vremenski promenljiv filter. Neka se korisnički signal sastoji od jednog simbola,  $x(t)$  i prenosi kroz kanal koji, na osnovu [1], preslikava jedan ulaz na konačno mnogo prebrojivih izlaza,  $y_m(t; \mathbf{p}_m)$ ,  $m \in \{1, \dots, M_j\}$ . Relacija ulaz-izlaz za ovakav filter se, prema slici 1,

$$\underline{x}(t) \longrightarrow \boxed{g_m(\tau, t)} \longrightarrow \underline{y}_m(t; \mathbf{p}_m)$$

Slika 1: Blok šema razmatranog (mobilnog) radio kanala.

zapisuje u obliku,

$$\begin{aligned} \underline{y}_m(t; \mathbf{p}_m) &= \int_{\mathbb{R}} g_m(\tau, t) \underline{x}(t - \tau) d\tau \\ &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathcal{S}^2} g_m(\tau, t, \omega) \underline{F}_m(\omega) \underline{x}(t - \tau) d\omega d\tau. \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathcal{S}^{2 \times 1}$  označava skup svih tačaka koje zadovoljavaju jednačinu sfere  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , pri čemu  $\{x, y, z\} \in \mathbb{R}^3$ . Jedinični vektor pravca dolaznog ravnog talasa,  $\omega$  dat je u sfernom koordinatnom sistemu tako da važi

$$\omega = \{\phi, \theta\} \in \mathcal{S}^{2 \times 1} \subset \mathbb{R}^{3 \times 1}. \quad (2)$$

Ugao  $\phi \in [-\pi, \pi]$  vezan je za azimut, dok je elevacioni ugao,  $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ . Vektor  $\omega$  se predstavlja u Dekartovom koordinatnom sistemu na osnovu sfernih koordinata prema

$$\omega = -[\cos(\theta) \cos(\phi), \cos(\theta) \sin(\phi), \sin(\theta)]_{3 \times 1}^T. \quad (3)$$

Impulsni odzivi  $g_m(\tau, t)$  i  $g_m(\tau, t, \omega)$  odgovaraju radio i propagacionom kanalu. Pri tome je  $g_m(\tau, t, \omega)$ , dat Furijeovom transformacijom

$$g_m(\tau, t, \omega) = \int_{\mathbb{R}} \underline{g}_m(\tau, \nu, \omega) e^{j2\pi\nu t} d\nu, \quad (4)$$

### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Milan Narandžić.

pri čemu za konačno mnogo propagacionih putanja,  $N$ , važi da je

$$\underline{g}_m(\tau, \nu, \omega) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \delta(\tau - \tau_n) \delta(\nu - \nu_n) \delta(\omega - \omega_n). \quad (5)$$

Koeficijent slabljenja putanje  $n \in \{1, \dots, N\}$  označen je sa  $\alpha_n \in \mathbb{C}$ . Dirakovi impulsi obeleženi su sa  $\delta(\tau): \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ ,  $\delta(\nu): \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$  i  $\delta(\omega): \mathcal{S}^2 \mapsto \mathbb{R}$ .

Kompleksna skalarna vrednost karakteristične funkcije zračenja kompleksnih vrednosti za element  $m$ ,  $\underline{F}_m(\omega)$  data je sa

$$\underline{F}_m(\omega) = a_m(\omega) e^{-j2\pi\langle \omega, \mathbf{q}_m \rangle}, \quad (6)$$

pri čemu je  $a_m(\omega)$  dijagram zračenja intenziteta električnog polja antenskog elementa  $m$ , dok je  $2\pi\langle \omega, \mathbf{q}_m \rangle$  fazni pomak antenskog elementa  $m$ . Normalizovani vektor položaja ovog elementa antenskog polja obeležen je sa  $\mathbf{q}_m \in \mathbb{R}^3$ ,

$$\mathbf{q}_m = \frac{\mathbf{p}_m}{\lambda}, \quad (7)$$

znajući da je  $\lambda$  talasna dužina. Unutrašnji proizvod između  $\omega$  i  $\mathbf{q}_m$ , iznosi

$$\langle \omega, \mathbf{q}_m \rangle = \mathbf{q}_m^H \omega = \mathbf{q}_m^T \omega. \quad (8)$$

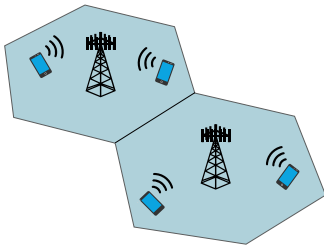
U radu su usvojene sledeće pretpostavke:

- antenski elementi su izotropne antene koje podjednako zrače u svim pravcima, a postavljene su u niz na jednakom međusobnom rastojanju od polovine talasne dužine;
- kanal je vremenski nepromenljiv u trajanju njegovog vremena koherencije,  $T_c$  koje je duže od trajanja (sekvence) simbola za prenos;
- kanal je frekvencijski neselektivan, odnosno opseg koherencije kanala,  $B_c$  širi je od spektra signala koji se prenosi.

Vremensko-frekvencijski neselektivan impulsni odziv radio kanala izotropnog elementa  $m$  tokom vremena koherencije i u opsegu koherencije obeležava se sa  $g_m \in \mathbb{C}$ , te više nije funkcija ni vremena, a ni frekvencije.

### 3. MODEL SISTEMA

Primljeni signal na jednoj baznoj stanici  $j$  od ukupno  $L$ , sa stanovišta  $\tau_p + \tau_u$  odbiraka u vremenu može se u domenu amplituda prema slici 2 zapisati kao matrica,  $\mathbf{Y}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times (\tau_p + \tau_u)}$ .



Slika 2: Skica postavke sistema u uzlaznom smeru prenosa

Zapis je dat na sledeći način:

$$\mathbf{Y}^j = \underbrace{\sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{x}_{jk}^T}_{\text{Željeni signali}} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq j}^L \sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{li}^j \mathbf{x}_{li}^T}_{\text{Međućelijska interferencija}} + \underbrace{\mathbf{N}^j}_{\text{Šum}}. \quad (9)$$

Korisnički signal koji dospeva iz iste ćelije dat je kao  $\mathbf{x}_{jk} \in \mathbb{C}^{(\tau_p + \tau_u) \times 1}$ , za razliku od poslatog signala korisničkog terminala izvan ćelije  $j$ , opisanog sa  $\mathbf{x}_{li} \in \mathbb{C}^{(\tau_p + \tau_u) \times 1}$ . Kanalni odzivi i šum označeni su sa  $\mathbf{g}_{jk}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times 1}$ ,  $\mathbf{g}_{li}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times 1}$  i  $\mathbf{N}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times (\tau_p + \tau_u)}$ , tim redom.

Za prvih  $\tau_p$  odbiraka složenog signala  $\mathbf{Y}^j$  namenjenih prenosu pilotskih sekvenci, može se definisati oznaka,  $\mathbf{Y}_j^p \in \mathbb{C}^{M_j \times \tau_p}$ . Korisnički signali u osnovnom opsegu tokom  $\tau_p$  odbiraka,  $\mathbf{x}_{jk} \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$  i  $\mathbf{x}_{li} \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$  postaju

$$\mathbf{x}_{jk} = \sqrt{p_{jk}} \phi_{jk} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_{li} = \sqrt{p_{li}} \phi_{li}, \quad (11)$$

pri čemu se pretpostavlja da su korisničke snage  $p_{jk} \in \mathbb{R}$  i  $p_{li} \in \mathbb{R}$  nepromenljive u trajanju  $\tau_p$  odbiraka. Karakteristike korisničkih pilotskih sekvenci,  $\phi_{jk} \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$  i  $\phi_{li} \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$  razmatraju se u sekciji 4.1. Poželjna je situacija u kojoj svi korisnici poseduju međusobno ortogonalne pilotske sekvence unutar ćelije.

Proizvod vremena i opsega koherencije u vremensko-frekvencijskoj ravni određuje dimenzije pravougolnika koji nosi naziv „koherentni blok”. Vremensko-frekvencijski resursi koherentnog bloka podeljeni su u vremenu na dva dela: uzlazni i silazni smer prenosa informacija. Ovaj protokol zadržava osobinu reciprocnosti fizičkog kanala, bez obzira na smer prenosa.

### 4. ESTIMACIJA STANJA KANALA

Korisnička pilotska sekvenca predstavlja skup znakova za raspoznavanje u svrhu estimacije njegovog kanala, pored drugih namena: identifikacije korisnika i sinhronizacije prenosa. U ovom radu pilotska sekvenca se upotrebljava isključivo za prvu od prethodno navedenih namena.

#### 4.1. Dizajn pilotskih sekvenci

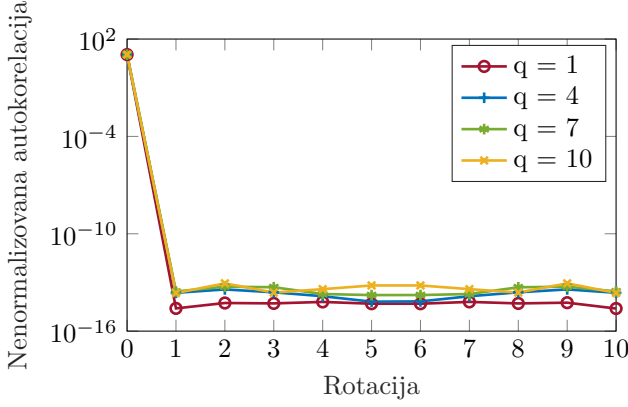
Optimalna knjiga pilotskih sekvenci za  $\tau_p$  korisnika može se zapisati kao  $\Phi \in \mathbb{C}^{\tau_p \times \tau_p}$ , pri čemu  $\Phi^H \Phi = \tau_p \mathbf{I}_{\tau_p}$  ukazuje na poželjnu osobinu međusobne ortogonalnosti svih njenih vektor-kolona, odnosno njenih  $\tau_p$  korisnika. Unutrašnji proizvod nad  $\Phi$  između bilo koje pilotske sekvence (uključujući i sekvencu  $\phi_{jk}$ ) sa sekvencom  $\phi_{jk}$  je,

$$\phi_{l'i'}^T \phi_{jk}^* = \begin{cases} \tau_p & \text{ako } (l', i') \in \mathcal{P}_{jk} \\ 0 & \text{inače.} \end{cases} \quad (12)$$

Skup  $\mathcal{P}_{jk}$  sadrži sve korisnike kojima je dodeljena identična pilotska sekvenca kao korisniku  $k$  iz ćelije  $j$ ,

$$\mathcal{P}_{jk} = \{(l', i') : \phi_{l'i'} = \phi_{jk} \\ l' = 1, \dots, L, i' = 1, \dots, K \\ (l'', i'') : \phi_{l''i''} = \phi_{jk} \\ l'' = 1, \dots, L, i'' = 1, \dots, K\}. \quad (13)$$

Modeluju se Zadof-Ču sekvence prema teorijskim osnovama iz rada [2]. Na slici 3, svi parovi dužine sekvenci  $N_{\text{Zadof-}\check{C}u} = 11$  i indeksa korena  $q \in \{1, \dots, N_{\text{Zadof-}\check{C}u} - 1\}$  su relativni prosti brojevi. Primećuje se minimalno odstupanje od željenih vrednosti autokorelacija/međukorelacija za idealne sekvence iz izraza (12), koje može biti posledica konačne preciznosti korišćene računarske platforme.



Slika 3: Autokorelacije Zadof-Ču sekvenci dužine 11

#### 4.2. Pilotska kontaminacija

Pilotska kontaminacija je vid korisničke interferencije kao posledice nedovoljnog broja jedinstvenih pilotskih sekvenci za dodelu korisnicima. Dodatno, svi korisnici koji dele (ponavljaju) takve pilotske sekvence poseduju međusobno neortogonalne prostorne autokorelacione matrice impulsnih odziva radio kanala. U takvim slučajevima, spektralna efikasnost opada sa povećanjem stepena ponavljanja date pilotske sekvence. Dakle, kada postoje korisnici koji dele pilotsku sekvencu, kontaminacija nastupa u trenucima neortogonalnosti prostornih korelacionih matrica korisnika ponavljajuće sekvence.

#### 4.3. Linearni Bajesov estimator

Bajesovi estimatori kanalnog odziva minimizuju rizik - očekivanu vrednost cene za datu funkciju cene,

$$\mathbb{E}\{l(\mathbf{g}_{jk}^j, \hat{\mathbf{g}}_{jk}^j(\mathbf{y}_{jk}^j))\}, \quad (14)$$

gde je funkcija cene  $l(\cdot, \cdot)$ , estimirani vektor je  $\hat{\mathbf{g}}_{jk}^j(\mathbf{y}_{jk}^j)$ , dok je apriori nepoznat vektor  $\mathbf{g}_{jk}^j$ . Za Bajesov rizik definisano je mnoštvo funkcija cene, tako da dizajner estimatora brine o izgledu funkcije cene. Neka je odabrana  $\ell^2$ -norma vektora greške procene,

$$\tilde{\mathbf{g}}_{jk}^j = \mathbf{g}_{jk}^j - \hat{\mathbf{g}}_{jk}^j(\mathbf{y}_{jk}^j), \quad (15)$$

tako da je funkcija cene

$$l(\mathbf{g}_{jk}^j, \hat{\mathbf{g}}_{jk}^j(\mathbf{y}_{jk}^j)) = \|\tilde{\mathbf{g}}_{jk}^j\|^2. \quad (16)$$

Linearni estimator minimalne srednje kvadratne greške procenjuje odziv kanala na osnovu izraza

$$\hat{\mathbf{g}}_{jk}^j = \mathbf{A}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j + \mathbf{b}_{jk}^j, \quad (17)$$

gde se kvadratna matrica  $\mathbf{A}_{jk}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times M_j}$  i vektor-kolona  $\mathbf{b}_{jk}^j \in \mathbb{C}^{M_j \times 1}$  združeno biraju u cilju minimizacije Bajesovog rizika za pomenuti estimator. Bajesov

rizik,  $\mathbb{E}\{\|\mathbf{g}_{jk}^j - (\mathbf{A}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j + \mathbf{b}_{jk}^j)\|^2\}$  minimizuje se odabirom parametara  $\mathbf{A}_{jk,\min}^j$  i  $\mathbf{b}_{jk,\min}^j$  na sledeći način:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{jk,\min}^j &= \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j}^{-1} \\ \mathbf{b}_{jk,\min}^j &= \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{jk}^j\} - \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j}^{-1} \mathbb{E}\{\mathbf{y}_{jk}^j\}. \end{aligned} \quad (18)$$

tako da je estimator oblika

$$\hat{\mathbf{g}}_{jk}^j = \mathbf{A}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j + \mathbf{b}_{jk}^j \Big|_{\mathbf{A}_{jk}^j = \mathbf{A}_{jk,\min}^j, \mathbf{b}_{jk}^j = \mathbf{b}_{jk,\min}^j}. \quad (19)$$

Srednja kvadratna greška pri proceni pomenutog kanalnog odziva data je sa

$$\text{MSE}_{jk}^j = \mathbb{E}\{\|\mathbf{g}_{jk}^j - (\mathbf{A}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j + \mathbf{b}_{jk}^j)\|^2\} = \text{tr}(\mathbf{C}_{\tilde{\mathbf{g}}_{jk}^j} \tilde{\mathbf{g}}_{jk}^j). \quad (20)$$

Minimizovana srednja kvadratna greška linearnog Bajesovog estimatora za korisnika  $k$  iz ćelije  $j$  na baznoj stanici  $j$  zapisuje se prema

$$\begin{aligned} \text{LMMSE}_{jk}^j &= \mathbb{E}\{\|\mathbf{g}_{jk}^j - (\mathbf{A}_{jk,\min}^j \mathbf{y}_{jk}^j + \mathbf{b}_{jk,\min}^j)\|^2\} \\ &= \text{tr}(\mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{g}_{jk}^j} - \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jk}^j \mathbf{y}_{jk}^j}^{-1} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jk}^j \mathbf{g}_{jk}^j}^H). \end{aligned} \quad (21)$$

Prema modelu sistema iz (9), nakon projektovanja prijemne sekvence  $\mathbf{Y}_j^p$  na konkretnu pilotsku sekvencu,  $\phi_{jk}$  dobija se

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{jjk}^p &= \mathbf{Y}_j^p \phi_{jk}^* \\ &= \sum_{(l', i') \in \mathcal{P}_{jk}} \sqrt{p_{l' i'}} \tau_p \mathbf{g}_{l' i'}^j + \mathbf{N}_j^p \phi_{jk}^*. \end{aligned} \quad (22)$$

Parametri za estimaciju kanala postaju:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{jjk,\min}^p &= \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jjk}^p} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jjk}^p \mathbf{y}_{jjk}^p}^{-1} \Big|_{\mathbf{y}_{jjk}^p = \mathbf{y}_{jjk}^p} \\ \mathbf{b}_{jjk,\min}^p &= \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{jk}^j\} - \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jjk}^p} \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jjk}^p \mathbf{y}_{jjk}^p}^{-1} \mathbb{E}\{\mathbf{y}_{jjk}^p\} \Big|_{\mathbf{y}_{jjk}^p = \mathbf{y}_{jjk}^p} \end{aligned} \quad (23)$$

smatrajući da su poznate i kovarijansne matrice:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{y}_{jjk}^p} &= \sqrt{p_{jk}} \tau_p \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{jk}^j \mathbf{g}_{jk}^j} \\ \mathbf{C}_{\mathbf{y}_{jjk}^p \mathbf{y}_{jjk}^p} &= \sum_{\{(l'', i''), (l', i')\} \in \mathcal{P}_{jk}} \sqrt{p_{l'' i''} p_{l' i'}} (\tau_p)^2 \mathbf{C}_{\mathbf{g}_{l'' i''}^j \mathbf{g}_{l' i'}^j} \\ &\quad + \mathbf{C}_{\mathbf{N}_j^p \phi_{jk}^* \mathbf{N}_j^p \phi_{jk}^*}. \end{aligned} \quad (24)$$

#### 4.4. Rezultati istraživanja

U svakoj od ukupno  $L = 16$  ćelija postavljena je po jedna bazna stanica. Bazne stanice su opremljene sa identičnim antenskim nizom sa uniformnim rastojanjem  $d = \frac{\lambda}{2}$  između  $M_j = 64$  antenskih elemenata,  $\forall j$ . U svakoj ćeliji nalaze se po  $K = 4$  fiksna korisnička terminala opremljena sa po jednom antenom. Preostali sistemski parametri preuzeti su iz [3, Sekcija 4.1.3].

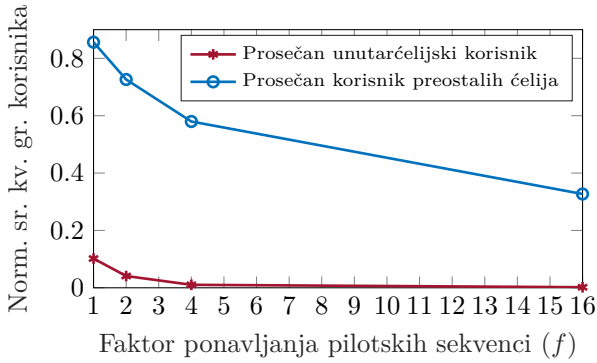
Estimiraju se korisnički kanali između svih kombinacija baznih stanica i korisničkih terminala u skladu sa tim da li se korisnici nalaze u istoj ćeliji  $j$  kao i bazna stanica ili u okolnim ćelijama  $l, l \neq j$ . Prosečna normalizovana srednja kvadratna greška pri proceni impulsnog odziva unutarćelijskih korisnika računa se prema

$$\overline{\text{NMSE}}_{\text{unutarćelijsko}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^L \frac{\text{tr}(C_{\mathbf{g}_{jk}^j} \tilde{\mathbf{g}}_{jk}^j)}{\text{tr}(C_{\mathbf{g}_{jk}^j} \mathbf{g}_{jk}^j)}. \quad (25)$$

Prosečna normalizovana srednja kvadratna greška pri proceni impulsnog odziva korisnika preostalih ćelija računa se prema

$$\overline{\text{NMSE}}_{\text{preostalih ćelija}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^L \sum_{l=1, l \neq j}^L \frac{\text{tr}(C_{\tilde{\mathbf{g}}_{lk}^j} \tilde{\mathbf{g}}_{lk}^j)}{\text{tr}(C_{\mathbf{g}_{lk}^j} \mathbf{g}_{lk}^j)}. \quad (26)$$

U oba slučaja se uprosečavanje izvršava po svim korisnicima na nivou svih odgovarajućih ćelija. U tom postupku se vrednost dobijena sumiranjem normalizuje sa brojem korisnika,  $K$ . Na slici 4 iscrtavaju se grafici normalizovane srednje kvadratne greške,  $\text{NMSE}_{lk}^j$  u zavisnosti od faktora ponavljanja pilotskih sekvenci,  $f \in \{1, 2, 4, 16\}$ .



Slika 4: Zavisnost greške estimacije od faktora ponavljanja pilotskih sekvenci

Ekstremne vrednosti koje  $f$  uzima objašnjavaju se na sledeći način:

- Kada je  $f = 1$ , svaka ćelija ponavlja identični skup pilotskih sekvenci (tako da korisnik  $k$  u jednoj od ćelija koristi identičnu sekvencu kao korisnik  $k$  u svim ostalim ćelijama, dok je korisnik  $j$  jedne ćelije i dalje ortogonalan sa korisnikom  $k$  iz svoje i svih ostalih ćelija).
- Kada je  $f = 16$ , svaka ćelija koristi jedinstven skup pilotskih sekvenci, što znači da su sada čak i korisnici  $k$  iz različitih ćelija međusobno ortogonalni. Dakle, bilo koja sekvenca je ortogonalna sa svim ostalim sekvencama gde god se njihovi korisnici nalazili u mreži.

Kada ne postoji pilotska kontaminacija u mreži ( $f = 16$ ), greška estimacije unutarćelijskih korisničkih kanala teži nuli, dok je za korisničke kanale iz ostalih ćelija znatno viša. Ovakav ishod se može objasniti postojanjem uticaja drugih faktora na grešku estimacije, osim faktora ponavljanja pilotskih sekvenci. Ključni preostali faktori su predajna snaga željenog korisničkog signala i njegovo slabljenje na trasi, interferencija koja nije posledica pilotske kontaminacije i šum.

## 5. ZAKLJUČAK

Uveden je model sistema u uzlaznom smeru prenosa sa tehnikom višestrukog pristupa korisnika zasnovanoj na prostornoj raspodeli. Za Zadof-Ču sekvence ispitane su i ilustrovane autokorelacione i među-korelacione osobine. Za estimaciju nepoznatog kanala korišćen je linearni Bajesov estimator koji minimizuje srednju kvadratnu grešku procene.

U izloženim rezultatima istraživanja za evaluaciju performansi razmatranog estimatora korišćena je normalizovana srednja kvadratna greška. Utvrđeno je da pored kontaminacije pilotskih sekvenci (tj. upotrebe neortogonalnih sekvenci), ukupnoj grešci estimatora doprinose i interferencija i šum. Iscrtane amplitudske karakteristike greške estimacije su opadajuće, pri čemu je pretpostavljeno da su neophodna statistička predznanja potpuno poznata, iako ih je u praktičnim okolnostima neophodno proceniti. U stvarnim sistemima se očekuju više vrednosti greške estimacije korisničkih kanala, u odnosu na prikazane vrednosti u ovom radu.

## 6. LITERATURA

- [1] G. Del Galdo, "Geometry-Based Channel Modeling for Multi-User MIMO Systems and Applications," doktorska disertacija, jul 2007. Dostupno na: [https://www.db-thueringen.de/receive/dbt\\_mods\\_00011002](https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00011002)
- [2] J. G. Andrews, "A Primer on Zadoff Chu Sequences," 2023. Dostupno na: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05702>
- [3] E. Björnson, J. Hoydis i L. Sanguinetti, "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency," *Foundations and Trends® in Signal Processing*, vol. 11, no. 3-4, pp. 154–655, 2017. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1561/20000000093>

### Kratka biografija:

**Aleksandar Birmančević** rođen je u Šapcu 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Telekomunikacioni sistemi odbranio je 2024. god.

Kontakt: [abirmancevic@uns.ac.rs](mailto:abirmancevic@uns.ac.rs)